

PATENTTI- JA REKISTERIHALLITUS  
NATIONAL BOARD OF PATENTS AND TRADE MARKS REGISTRATION

Helsinki 2.11.2000

PCT/FI 00/00824

10-089161

REC'D 21 NOV 2000

WIPO PCT

E T U O I K E U S T O D I S T U S  
P R I O R I T Y   D O C U M E N T



Hakija  
Applicant

Valtion teknillinen tutkimuskeskus  
Espoo

Patentihakemus nro  
Patent application no

19992092

Tekemispäivä  
Filing date

29.09.1999

Kansainvälinen luokka  
International class

G01J

Keksinnön nimitys  
Title of invention

"Spektrometri ja menetelmä optisen spektrin mittaaniseksi"

Täten todistetaan, että oheiset asiakirjat ovat tarkkoja jäljennöksiä patentti- ja rekisterihallitukselle alkuaan annetuista selityksestä, patenttivaatimuksista, tiivistelmästä ja piirustuksista.

This is to certify that the annexed documents are true copies of the description, claims, abstract and drawings originally filed with the Finnish Patent Office.

Marketta Tehikoski  
Apulaistarkastaja

**PRIORITY  
DOCUMENT**

SUBMITTED OR TRANSMITTED IN  
COMPLIANCE WITH RULE 17.1(a) OR (b)

Maksu 300,- mk  
Fee 300,- FIM

Osoite: Arkadiankatu 6 A Puhelin: 09 6939 500 Telefax: 09 6939 5328  
P.O.Box 1160 Telephone: + 358 9 6939 500 Telefax: + 358 9 6939 5328  
FIN-00101 Helsinki, FINLAND

## Spektrometri ja menetelmä optisen spektrin mittaamiseksi

### Keksinnön ala

Keksintö kohdistuu spektrin mittaukseen. Eriyisesti eksinnön kohteena on menetelmä optisen spektrin mittaamiseksi ja spektrometri.

#### 5 Keksinnön tausta

Spektrometrejä käytetään optisen säteilyn intensiteetin aallonpituisjakauman analysointiin. Skannaavissa hila- ja prismamonokromaattoreissa mitattava säteily tuodaan laitteen sisään ns. tuloraosta ja säteily hajotetaan eli dispersoidaan hilan ja prisman avulla niin, että yksi aallonpituuksista ker-  
10 rallaan johdetaan yksittäiselementtidetektorille ja mitattavan säteilyn intensi- teettispektri rekisteröidään suoraan hilan tai peilin liikkeen funktiona. Laite mittaa vain yhtä aallonpituuksista kerrallaan ja näin ollen hukkaa suurimman osan käytettävässä olevasta optisesta tehosta ja laitteessa tarvittava erittäin tarkka mekaaninen liike ja sen mittaus on kallis toteuttaa, ikääntyy käytössä,  
15 on herkkä lämpölaajenemiselle, lialle ja tärinälle. Hilan liikkeen epämääräisyys ja siitä johtuva aallonpituuusasteikon ryömintä on suurin virhetekijä käytettäes- sä laitteita pitkääkaisesti näytteiden kemiallisen koostumuksen kvantitatiivi- seen tai kvalitatiiviseen analysiin NIR alueella (Near InfraRed).

Fourier Transform Infra Red (FTIR) -laitteissa mitattava säteily joh-  
20 detaan Michelson-interferometrin lävitse, jonka optisten haarojen määräämää optista matkaeroa muutetaan liikkuvan peilin avulla mittauksen aikana. Interfe- rometrin läpäisseen säteilyn intensiteetti mitataan optisen matkaeron funktiona yksittäiselementtidetektorin avulla ja näin saatuja intensiteettijakaumia optisen matkaeron funktiona kutsutaan interferogrammiksi. Säteilyn intensiteettispektri  
25 lasketaan interferogrammista Fourier-muunnoksella. FTIR-laite mittaa kaikki aallonpituuudet samanaikaisesti. Tämän ns. multipleksausetunsa vuoksi FTIR- laite tuottaa merkittävästi skannaavaa hilamonokromaattoria paremman signaalikohinasuhteen, mikäli detektorin kohina on dominoiva kohinalähde, kuten se lähes aina IR-alueella on. Koska tekniikka vaatii liikkuvan peilin sisältämän  
30 interferometrin, on se äärimmäisen herkkä ympäristön tuottamille häiriöille kuten tärinälle ja lämpötilan vaihteluiille. Lisäksi näytteen liikkeestä johtuva modulaatio tuottaa häiriötä liikkuvaa näytettä mitatessa.

Skannaava hilamonokromaattori voidaan toteuttaa ilman mekaani-  
35 sen liikkeen ongelmia luomalla hila akustisen aallon avulla ns. AOTF- komponentissa (Acusto Optical Tunable Filter). Skannaus suoritetaan muut-

tamalla hilavakiota ja siten sen kulmadispersiota akustisen aallon taajuutta muuttamalla. Tämä tekniikka on kuitenkin kallista, sen lävitse saatava optisen tehon määrä on pieni eikä sillä saavuteta multipleksausetua.

Hilaspektrografissa tulorako kuvataan hilan kautta monielementtisen (esim. 16 - 1024) rividetektorin pinnalle niin, että tuloraon kuvan paikka rividetektorilla siirtyy rivin pituussuunnassa (elementiltä toiselle) aallonpituuden funktiona, jolloin detektorin elementit rekisteröivät kunkin omaa aallonpituuksiaansa. Näin toteutetussa spektrografissa ei tarvita liikkuvia osia ja sillä saavutetaan multipleksausetu. Kuitenkin IR-alueella teknikan tarvitsema rividetektori on kallis, minkä lisäksi tarvitaan signaalin ilmaisuun kallis ja vaativa lukuelektroniiikka. Aallonpituuksalueen tai resoluutiovaatimuksen muuttuessa joudutaan usein kalliiseen uuden rividetektorin kehityskierrokseen. Absorptiospektroskopiaan perustuvissa pitoisuusmittalaitteissa sovelletaan ns. suhdemittausta, jolla eliminoidaan säteilylähteen lämpötilan, mittausgeometrian, sironnan ja detektorin vasteen muutoksia laskemalla ennuste mitattavan aineen pitoisuudelle mitattavan aineen absorptioaallonpituuudella ja sen vierestä valitulla referenssiaallonpituuudella mitattujen intensiteettien suhteesta, jolloin aallonpituudesta riippumattomat "kerointyyppiset" virheet eliminoituvat jakolaskussa. Koska rividetektorin eri elementtien aallonpituusvasteet ovat valmistusprosessin epätäydellisyystä johtuen erilaiset, niiden lämpötilat vaihtelevat hieman eri tahtiin, syntyy tästä aallonpituudesta ja ajasta riippuva virhettä. Tämän vuoksi rividetektorin lämpöstabilointi on huomattavasti yksittäiselementtidektorin stabilointia vaikeampaa ja tämä johtaa kalliisiin ja raskeisiin ratkaisuihin laitetoteutuksessa.

Uudentyyppisiä, halpaan hintaan tähtääviä spektrometrejä on toteutettu moduloimalla aallonpituusselektiivisesti eri aallonpituuskanavia hilaspektrografin rividetektorin tilalle sijoitetulla piimikromekaanisella peilimatriisilla (DMD, Deformable Micromirror Device) tai muun tyypillisellä spatiaaliseen modulointiin soveltuvalla komponentilla. Moduloidut optiset signaalit kuvataan detektorille ja mitattavien aallonpituuskanavien intensiteetit ilmaistaan demoduloimalla detektorin mittaamasta signaalista. Koska aallonpituudet toisistaan erottava hila levittää tuloraon kuvan modulaattorin pinnalle, on myös siitä edelleen muodostettava kuva suuri, joten toteutettava laite vaatii suuren pinta-alan omaavan detektorin, joka on kallis, usein vaikeasti saatavissa ja jonka kapasitanssi on myös suuri, mikä johtaa hitaaseen detektorin toimintaan. Myös tässä ratkaisussa detektorin lämpötilariippuvuus on ongelma ja lämpötilasta-

bilointia tarvitaan. Tällaista ratkaisua on kuvattu tarkemmin julkaisussa Bachelor, J., D., Jones, B., T.: Development of a Digital Micromirror Spectrometer for Analytical Atomic Spectrometry, Analytical Chemistry, Vol. 70, No. 23, s. 4907 - 4914, December 1, 1998, joka otetaan täähän viitteeksi.

- 5 Erittäin halpoja miniatyrispektrografeja on toteutettu suurissa sarjoissa massatuototekniikoilla (LIGA yms. ), mutta niiden ongelmana on heikkolaatusista optisista pinnoista siroava, kaikkia aallonpituuksia sisältävä hajavalo, joka leviää rividetektorin pinnalle ja muodostaa tason, jota pienempiä optisia tehoja ei voida luotettavasti havaita. Tämä rajoittaa mitattavissa olevaa  
 10 absorboivan aineen pitoisuuden vaihtelualuetta. LIGA-teknikkaa on selitetty tarkemmin esimerkiksi julkaisussa P. Kripper, J. Mohr, C. Müller, C. Van der Sel, Microspectrometer for the Infrared Range, SPIE vol. 2783, pages 277 - 282, 1996, mikä otetaan täähän viitteeksi. Lisäksi LIGA-teknikkaa on selitetty tarkemmin myös julkaisussa Handbook of Microlithography, Micromachining,  
 15 and Microfabrication, P. Rai-Choudhury, editor, vol. 2 Micromachining, and Microfabrication, pages 237 - 377, 1997.

### Keksinnön lyhyt selostus

- Keksinnön tavoitteena on siten toteuttaa menetelmä ja menetelmän toteuttava spektrometri siten, että yllä mainitut ongelmat saadaan ratkaistua.  
 20 Tämän saavuttaa johdannossa esitetyn tyypin menetelmä optisen säteilyn spektrin mittamiseksi spektrometrillä. Menetelmässä valaistaan spektrometrin tulorako optisella säteilyllä ja kuvataan tulorako optiselle modulaattorille, joka käsittää moduloivia elementtejä; hajotetaan dispersiivisellä komponentilla tuloraon kuva spektriksi siten, että kukin spektrin aallonpituus muodostaa tulorasta oman kuvansa, jonka paikka optisen modulaattorin elementeillä riippuu aallonpituuudesta; moduloidaan dispersoitua tuloraon kuvaa ainakin yhdellä optisen modulaattorin elementillä, jolloin muodostuu ainakin yksi tuloraon kuvasta moduloitu aallonpituuksista; kohdistetaan ainakin yksi moduloitu aallonpituuksista dispersiiviselle komponentille, jolla koostetaan ainakin yhdestä 25 moduloiduista aallonpituuksista dispersioton mittaussäteily siten, että kuvaa muodostettaessa kaikilla eri aallonpituuksilla tuloraon kuvat muodostuvat samaan paikkaan aallonpituudesta riippumatta; kuvataan dispersiottoman mittaussäteilyn avulla tulorako lähtöräkoon; detektoidaan lähtöraosta saatava mittaussäteily yhdellä detektorilla, joka muuntaa mittaussäteilyn sähköiseksi  
 30 mittauksignaaliksi; demoduloidaan sähköinen mittauksignaali eri aallonpituuksista jojen aikaansaamien signaalikomponenttien erottamiseksi toisistaan; ja  
 35 mittauksignaalin avulla tulorakon lähtöraosta saatava mittaussäteily yhdellä detektorilla, joka muuntaa mittaussäteilyn sähköiseksi mittauksignaaliksi; demoduloidaan sähköinen mittauksignaali eri aallonpituuksista jojen aikaansaamien signaalikomponenttien erottamiseksi toisistaan; ja

mitataan ainakin yhtä aallonpituuksista ainakin yhden signaalikomponentin avulla.

Keksinnön kohteena on myös spektrometri optisen spektrin mittamiseksi. Spektrometri käsittää: tuloraon, ainakin yhden dispersiivisen komponentin, ainakin yhden kuvaavan komponentin, optisen modulaattorin, lähtöraon ja yhden detektorin ja spektrometrissa tulerako on sovitettu rajoittamaan spektrometriin tulevan optisen säteilyn ja kuvaava komponentti on sovitettu kuvaamaan tuloraon modulaattorille, joka käsittää moduloivia elementtejä; dispersiivinen komponentti on sovitettu hajottamaan tuloraon kuvan spektriksi siten, että kukin spektrin aallonpituuus muodostaa tuloraosta oman kuvansa, jossa paikka optisen modulaattorin elementeillä riippuu aallonpituuudesta; optinen modulaattori on sovitettu moduloimaan dispersoitua tuloraon kuvaan ainakin yhdellä optisen modulaattorin elementillä ainakin yhden tuloraon kuvasta moduloidun aallonpituuksistaan muodostamiseksi; dispersiivinen komponentti on sovitettu koostamaan ainakin yhdestä moduloidusta aallonpituuksistaan dispersiotoman mittaussäteilyn siten, että kuva muodostetaessa kaikilla eri aallonpituuksilla tuloraon kuvat muodostuvat samaan paikkaan aallonpituudesta riippumatta; kuvaava komponentti on sovitettu kuvaamaan mittaussäteilyn avulla tulerako lähtörakoon; yksi detektori on sovitettu detektoimaan lähtöraosta tulevaa mittaussäteilyä ja muuntamaan mittaussäteilyn sähköiseksi mittaussignaaliksi; spektrometri on sovitettu demoduloimaan sähköisen mittaussignaalin eri aallonpituuksistaan aiheuttamien signaalikomponenttien erottamiseksi toisistaan; ja spektrometri on sovitettu mittamaan ainakin yhtä aallonpituuksistaan ainakin yhden signaalikomponentin avulla.

Keksinnön edulliset suoritusmuodot ovat epäitsenäisten patenttivaatimusten kohteena.

Keksintö perustuu siihen, että käytetään yhtä pieniä detektoria spektrin sarjamuotoiseen detektointiin. Pientä detektoria voidaan käyttää, koska dispersoitu spektri koostetaan dispersiivisellä komponentilla siten, että eri aallonpituukskomponenteilla tulerako kuvautuu samaan paikkaan, ja koostettu mittaussignaali voidaan fokusoida pienelle detektorille. Lisäksi näytteen kuvaamisen sijasta tulerako kuvataan modulaattorille ja modulaattorilta tulerako kuvataan lähtörakoon.

Keksinnön mukaisen menetelmällä ja järjestelmällä saavutetaan useita etuja. Koska ratkaisussa käytetään dispersioivaa komponenttia kahdesti, mittaussignaali voidaan koostaa dispersoituneesta spekristä ja kuvata läh-

törakoon hyvin pieneksi tuloraon kuvaksi, mikä mahdollistaa yhden, pinta-alaltaan pienen detektorin käytön. Pienen detektorin kapasitanssi on pieni ja nopeus suuri, mikä mahdollistaa suuren sarjamuotoisen analysointinopeuden. Myös aallonpituuusvaste yhdellä detektorilla on eri aallonpituuksilla ajallisesti 5 muuttumaton. Koska makroskooppisesti liikkuvia osia ei tarvita, spektrometrin rakenne- ja toiminta on stabiilia ja ympäristösietoista ja spektrometri voidaan toteuttaa käyttäen hinnaltaan edullisia komponentteja, jotka ovat kulumatotia. Keksinnön mukainen ratkaisu on mahdollista integroida miniatyrispek- 10 troskoopiksi, jossa spektrometrin rakenteen avulla hajavalon vaikutusta on tehokkaasti vähennetty.

### Kuvioiden lyhyt selostus

Keksintöä selostetaan nyt lähemmin edullisten suoritusmuotojen yhteydessä, viitaten oheisiin piirroksiin, joissa

- 15 kuvio 1A esittää spektrometrin lohkokaaviota,
- kuvio 1B esittää spektrometrin lohkokaaviota,
- kuvio 2A esittää spektrometrin konfiguraatiota,
- kuvio 2B esittää spektrometrin konfiguraatiota,
- kuvio 3 esittää spektrometrin konfiguraatiota,
- kuvio 4A esittää optisten kuitujen käyttöä spektrometrissä,
- 20 kuvio 4B esittää kuitukimpun päätä,
- kuvio 5A esittää kuvaavan linssin ja hilan sijoittelua spektrometris-  
sa,
- kuvio 5B esittää kuvaavan linssin ja hilan yhdistämistä spektromet-  
rissa,
- 25 kuvio 6 esittää läpäisevän optisen modulaattorin käyttöä spektro-  
metrissa,
- kuvio 7A esittää optista modulaattoria, joka heijastaa optista sätei-  
lyää, ja
- kuvio 7B esittää optista modulaattoria, joka läpäisee optista sätei-  
30 lyää.

### Keksinnön yksityiskohtainen selostus

Keksinnön mukainen mittausmenetelmä ja spektrometri soveltuvat erityisesti läpäisy- ja heijastusmittauksiin, joilla määritetään esimerkiksi aineiden pitoisuksia, paksuuksia tai lämpötilaa, näihin kuitenkaan rajoittumatta. 35 Keksinnön mukaisella ratkaisulla voidaan toteuttaa sähköisesti ohjattava, ha-

Iutulla tavalla valittavat, jyrkkäreunaiset päästö- ja estokaistat omaava suodatin, jollaista tarvitaan esimerkiksi tutkimuslaitteissa. Lisäksi keksinnöllistä ratkaisua voidaan soveltaa esimerkiksi automaattisissa prosessianalysaattoreissa ja sensoreissa, joissa tärkeää on muun muassa edullinen hinta, pieni koko ja immuneetti ympäristön vaikuttuksille.

Tarkastellaan aluksi keksinnön mukaista ratkaisua kuvion 1A avulla. Se, tarvitseeko spektrometri optisen tehonlähteent 100, riippuu sovelluksesta. Jos näyte 102 on esimerkiksi itsesäteilevä, optista tehonlähdettä 100 ei välttämättä tarvita. Optisena tehonlähteenä voidaan käyttää laajakaistaista 10 tehonlähdettä kuten aurinkoa, päivänvaloa, hehkulankalamppua, halogeenilamppua, kaasupurkauslamppua jne. Joissain sovelluksissa voidaan käyttää myös kapeampaa optista kaiстaa, joka saavutetaan suodattamalla laajakaista-säteilyä tai käytämällä optisena tehonlähteenä esimerkiksi erilaisia lasereita ja ledejä. Optisella säteilyllä tässä hakemuksessa tarkoitetaan sellaista säteilyä 15 aallonpituualueella, joka tyhjössä alkaa ultraviolettisäteilystä (noin 40 nm) ja jatkuu kaukoinfrapuna-alueelle (noin 1 mm).

Näyte 102 sijaitsee tässä ratkaisussa tuloraon 104 edessä. Näytteestä 102 säteily emittoituu, heijastuu tai siroaa spektrometrin tulorakoon 104, joka rajoittaa spektrometriseen mittaukseen tulevaa säteilyä. Rako 104 on tyy- 20 pillisesti suorakaiteen muotoinen kooltaan esimerkiksi  $20 \mu\text{m} - 1000 \mu\text{m} \times 1 \text{ mm} - 15 \text{ mm}$ , vaikka aukon 104 muoto ja koko eivät olekaan keksinnön kannalta erityisen oleellisia. Keksinnön mukaisessa ratkaisussa rako 104 kuvaataan kuvaavalla elementillä, jonka optinen komponentti 106 käsittää, optiselle modulaattorille 108. Kuvauksen lisäksi aukosta 104 tuleva säteily hajotetaan 25 spektriksi dispersiivisellä komponentilla, jonka myös optinen komponentti 106 käsittää. Dispersiivisenä komponenttina voi toimia prisma tai hila. Dispersiossa hilalle päätee likimain, että lähtökulman ja tulokulman erotus kerrottuna hilavakiolla on aallonpituuuden kertaluku eli kaavana  $a(\sin \theta_m - \sin \theta_i) = m \lambda$ , missä  $a$  on hilavakio,  $\theta_m$  on lähtökulma,  $\theta_i$  on tulokulma. Prisman dispersio perustuu 30 siihen, että prismen suhteellinen taitekerroin  $n$  on aallonpituuuden  $\lambda$  funktio. Prismen taitumislaista  $\sin \alpha - n(\lambda) \sin \beta = 0$  nähdään, että tulokulman sinifunktioon  $\sin \alpha$  suhde lähtökulman sinifunktioon  $\sin \beta$  on sama kuin suhteellinen taitekerroin  $n$ , joka riippuu aallonpituuudesta. Nämä dispersoiva komponentti 35 suuntaa eri aallonpituisen optisen säteilyn eri kulmiin. Kuvaavana elementtinä voi toimia linssi, linssiyhdistelmä, peili, peiliyhdistelmä tai linssi(e)n ja peili(e)n yhdistelmä sinänsä tunnetulla tavalla.

Modulaattorina 108 on edullisesti sähköisesti ohjattava spatioalinen optisen säteilyn modulaattori, jota on tarkemmin kuvattu kuviossa 7. Modulaattori 108 käsittää esimerkiksi pieniä läpäiseviä tai heijastavia elementtejä, joiden läpäisyä tai heijastusta voidaan erikseen muuttaa. Optisen komponentin 5 106 dispersiiviseltä komponentilta kohdistuu kullekin läpäisevälle tai heijastavalle elementille tietty kapea spektrin osa eli aallonpituiskaista. Modulaattorilla 108 voidaan aallonpituiskaistoja moduloida eli tietyllä ajanhetkellä modulaattorilla 108 voidaan valita muita aallonpituiskaistoja vaimentamalla ainakin yksi optisen komponentin 106 dispersiivisen komponentin tuottama aallonpituis-10 kaista, joka etenee edelleen optisen komponentin 106 dispersiiviselle komponentille. Dispersiivisellä komponentilla spektraalisiin komponentteihin hajotetun optisen säteilyn osuessa toistamiseen samaan tai ainakin toiseen samanlaiseen dispersiiviseen komponenttiin säteilyn dispersiivisyys poistuu eli spektraalisten komponenttien dispersiosta johtuva suunnan kulmajakauma 15 poistuu. Tällä tavalla keksinnön mukaisessa ratkaisussa dispersiivinen komponentti ensin dispersoi optisen säteilyn ja sama tai eri dispersiivinen komponentti koostaa yhdestä tai useammasta aallonpituiskaistasta mittaussäteilyn. Mittaussäteilyllä muodostetussa kuvassa eri aallonpituuksien kuvat tuloraosta ovat oleellisesti samassa paikassa. Lohkossa 106 modulaattorilta 108 tuleva 20 optinen mittaussäteily myös kuvataan lähtörakoon 104, joka voi olla sama tai eri kuin tulorako. Tuloraosta 104 optinen säteily etenee detektorille ja edelleen mittauslaitteisiin detekointi- ja mittauslohkossa 110. Modulaattorin 108 ja detekointi- ja mittauslohkon 110 toimintaa ohjaa ohjausyksikkö 112.

Kuviossa 1B on muutoin samanlainen keksinnöllisen spektrometrin 25 lohkokaavio, mutta tässä ratkaisussa näytteen 102 ja tuloraon 104 sijainti on eri. Näyte 102 sijaitsee tässä esimerkissä tuloraon 104 edessä. Tässä ratkaisussa ei voida käyttää itsesäteilevää näytettä. Muutoin mittaustoiminta ja spektrometrin osat ovat oleellisesti samanlaiset.

Kuviossa 2A on kuvattu keksinnön mukaista ratkaisua, jossa näyte 30 ei ole itsesäteilevä. Optisesta teholähteestä 200 optinen säteily kohdistetaan näytteen 202 pintaan. Näytteestä 202 optinen säteily heijastuu ja siroaa tulorakoon 204, josta optinen säteily edelleen kohdistuu koveraan peiliin 206, joka käsittää hilan 2062. Hila 2062 on esimerkiksi kuvioitu esimerkiksi holografisesti, fotolitografialla tai suoraan mekaanisesti työstämällä peilin 206 pintaan si-35 nänsä tunnetulla tavalla. Peili 206 kuvaa tuloraon 204 tasopeilin 208 kautta optiselle modulaattorille 210. Optinen modulaattori 210 valikoi tai moduloi ai-

ka,- taajuus- tai koodijakoisesti aallonpituuksiaistat, jotka optinen modulaattori 210 heijastaa tasopeilin 212 kautta takaisin koveraan peiliin 206. Optinen modulaattori 210 on esimerkiksi pienä peilelementtejä käsittevä DMD-komponentti. Poikkeutusoptyikkana tarvitaan peilejä 208 ja 212, jotka mahdolistavat samanlaisen optiikan (dispersoiva komponentti 2062 ja kuvaava optinen komponentti 206) käyttämisen optisen modulaattorin 210 molemmin puolin niin, että tuloraon 204 kuva muodostuu tuloraon 204 vieressä olevaan lähtörakoon 214. Peilejä 208 ja 212 tarvitaan, jotta tulorako 204 ja lähtörako 214 voitaisiin fyysisesti erottaa toisistaan heijastuskulman avulla. Koverassa peilisä 206 oleva hila koostaa aallonpituuksiaistat mittaussäteilyksi ja kovera peili 206 heijastaa ja fokusoi mittaussäteilyn lähtörakoon 214, jossa oleva detektori 216 ottaa mittaussäteilyn vastaan ja muuntaa optisen mittaussäteilyn sähköiseksi mittaussignaaliksi. Keksinnön kaikille toimintamuodoille on yhteistä, että hilaviivojen on oltava tulo- ja lähtörakojen kanssa samansuuntaisia, jotta spektrometri toimisi oikein, koska spektri jakautuu hilaviivojen suuntaa vastaan kohtisuoraan. Kuviossa 2A tämä tarkoittaa sitä, että optisella modulaattorilla aallonpituuksjakauma on paperin pinnan normaalilin suuntainen. Keksinnöllisessä ratkaisussa on oleellista myös se, että vaikka detektorin detektointipinta-ala on pieni, tavallisesti korkeitaan muutamia mm<sup>2</sup>, tuloaukko kuvataan oleellisesti 20 kokonaan detektorille. Tällä tavalla eksinnöllinen ratkaisu ei hukkaa optista tehoa ohi detektorin. Keksinnöllisessä ratkaisussa eroteltavien aallonpituuksiaistojen määrä N on tavallisesti N = 4 - 1000. Yhden aallonpituuksistaan leveys eksinnöllisessä ratkaisussa on tyypillisesti nanometristä muutamaan kymmeneen nanometriin siihen kuitenkaan rajoittumatta. Saavutettava aallonpituuusresoluutio  $\Delta\lambda$  on näinollen hyvä. Detektorioptiikan puoliavauskulma on noin 35°, mikä on ainakin yhtä hyvä kuin parhaimmilla tunnetuilla spektrometreillä. Detektorille saatava irradientti eli tehotiheys on verrannollinen tuloon  $L^*$   $\Delta\lambda^*\Omega$  missä L = mitattavan säteilyn spektraalinen radianssi,  $\Delta\lambda$  = aallonpituuksistaan (kanavan) leveys (nm),  $\Omega$  = avaruuskulma, jonka tuleva säteily detektorista katsottuna täyttää. L ja  $\Delta\lambda$  määrytyvät sovellukselle ominaisista rajatuksista, mutta käytettävä laitetekniikka määräää maksimiavion  $\Omega$ :lle. Koska  $\Omega$  on verrannollinen tulevan säteilyn puoliavaumakulmaan, detektorille saatava tehotiheys riippuu voimakkaasti käytetystä optiikkaratkaisusta.

Sähköinen mittaussignaali siirretään edelleen automaattiseen signaalinkäsittely- ja analysointilaitteeseen (ei esitetty kuviossa 2A), jossa mittaussignaalia suodatetaan ja aallonpituuksistaatietoja käsitellään automaatti-

sella tietojenkäsittelylaitteistolla. Näytteestä 202 voidaan mitata spektrianalyysin avulla esimerkiksi pinnoitteen paksuutta. Tällöin voidaan mitata esimerkiksi paperin pinnassa olevan kaoliinin tms. paksuutta. Modulaattorin 210 toimintaa ohjaan ohjausyksikkö 218, joka on toiminnallisesti yhdistetty muuhun mittaus-

5 laitteistoon.

Kuviossa 2B on esitetty mittausjärjestelyn periaate, jossa näyte 230 on itsesäteilevä. Näytteen 230 säteilemä optinen säteily etenee tuloraon 232 kautta peilin 234 ja hilan 2062 yhdistelmälle. Aallonpituuuskaistoikseen hajotettu optinen säteily muodostaa tuloraon kuvan peilin 236 kautta modulaattonalle 238, joka moduloi optista säteilyä ja heijastaa moduloidut aallonpituuuskaistat peilin 240 kautta peilin 234 ja hilan 2062 yhdistelmälle. Hilan 2062 koostama ja peilin 234 fokusointia optinen mittaussignaali kuvaautuu lähtöraakoon 242, jossa detektori 244 detektoi optisen mittaussignaalini ja muuntaa sen sähköiseksi tietojen käsittelyä varten. Vaikka keksinnöllisessä ratkaisussa 10 on luonnollisesti aina lähtörako 242, erillistä lähtörakokomponenttia ei vältämättä tarvita, vaan lähtörakona 242 voi toimia detektori 244 esimerkiksi siten, että detektoiva pinta tms. määrittää lähtöraon. Myös tässä spektrometrijärjestelyssä mittausta ohjaan mittausyksikkö 246.

15

Kuviossa 3 keksinnön mukaista järjestelyä on kuvattu hieman tarkemmin käyttäen esimerkinä läpivalaistavaa näytettä. Optisen tehonlähteentä 300 säteilyä kerätään optisella elementillä 302, joka voi olla linssi, linssiyhdistelmä, peili tai peiliyhdistelmä, ja kohdistetaan kerätty optinen säteily näytteenseen 304. Näytteestä heijastunut, läpimennyt ja/tai sironnut säteily kerätään tulorakoon 308 optisella elementillä 306, joka myös voi olla linssi, linssiyhdistelmä, peili tai peiliyhdistelmä. Keksinnöllisessä ratkaisussa optinen elementti 20 306 on toteutettu edullisesti Köhler-optiikalla. Tässä ratkaisussa tuloraosta 308 tuleva optinen säteily kollimoidaan eli yhdensuuntaistetaan koveran peilin 310 avulla ja heijastetaan hilalle 312. Hila 312 heijastaa spektriksi hajotetun optisen säteilyn toiselle koveralle peilille 314, joka kuvailee tuloraon tasopeilin 316 kautta optiselle modulaattorille 318. Optisesta modulaattorista 318 moduloitu optinen säteily heijastetaan toisen tasopeilin 320 kautta takaisin koveralle peilille 314, joka kollimoi hajaantuvan optisen säteilyn hilalle 312. Hila 312 koostaa aallonpituuuskaistoista mittaussäteilyn ja heijastaa mittaussäteilyn koveralle peilille 310, joka lopulta kuvailee tuloraon 308 lähtörakoon 322. Optinen elementti 25 324 kuvailee tuloraon 322 detektorille 326, joka detektoi optisen mittaus-signaalin.

- Kuviossa 4A ja 4B on esitetty ratkaisu, jossa tulorako ja lähtörako ovat kuitukimpun pää. Tämä ratkaisu yksinkertaistaa oleellisesti tulo- ja lähtöraon ja optisen modulaattorin välistä optiikkaa, mahdollistaa suuren numeerisen aukon käytön ja se on helposti sovellettavissa näkyvän valon ja lähi-infrapunan alueille. Kuitukimpusta 400 optinen säteily kohdistetaan koveraan peiliin 402, joka käsittää myös hilan 401. Peili 402 kuvailee kuitukimpun pään optiselle modulaattorille 404. Kukin optisen modulaattorin 404 elementti 406 näkee eri aallonpituuksistaan muodostaman kuvan kuitukimpun päästä (kaksi eri aallonpituuksistaan on esitetty kuvassa yhtenäisellä viivalla ja katkoviivalla).
- Optisen modulaattorin 404 elementit 406 heijastavat moduloidun kuvan takaisin koveralle peilille 402, jonka hila 401 koostaa modulaattorilta 404 heijastuneesta optisesta säteilystä mittaussäteilyä. Mittaussäteily heijastetaan takaisin kuitukimpun pähän, jolloin kuitukimpun kuva (tulorako) kuvautuu kuitukimpun pähän (lähtörako).
- Kuviossa 4B on kuvattu kuitukimpun 400 päästä. Kuitukimppu 400 käsittää optista säteilyä lähetäviä kuituja 408 ja optista säteilyä vastaanottavia kuituja 410. Optinen teho syötetään lähetäviin kuituihin 408 optisesta tehon-lähteestä 420 esimerkiksi optisen elementin 422 avulla, joka on linssi tai peili. Vastaanottokuidusta 410 optinen teho kohdistetaan detektorille 424 optisen elementin 426 avulla, joka on linssi tai peili. Lähetävät kuidut 408 ja vastaanottavat kuidut 410 on sekotettu keskenään.

- Kuviossa 5A on esitetty keksinnöllinen ratkaisu, jossa on hyödynnetty linssejä. Tuloraosta 500 optinen säteily osuu linssiin 502, joka kollimoi optisen säteilyn. Hila 504 dispersoi optisen säteilyn ja linssi 506 kuvailee tuloraon peilin 508 kautta optiselle modulaattorille 510. Moduloitu optinen säteily heijastuu peilin 512 kautta takaisin linssille 506, joka kollimoi optisen säteilyn. Hila 504 koostaa optisesta säteilystä mittaussäteilyn ja linssi 502 kuvailee optisen säteilyn lähtörakoon 514, johon muodostuu tuloraon 500 kuva. Mittaus-säteilyn käsittely tästä eteenpäin on samanlaista kuin muiden kuvioiden tapauksessa.

- Kuvio 5B on muutoin samanlainen kuin kuvio 5A, mutta tässä ratkaisussa kaksi linssia 502, 506 ja hila 504 on yhdistetty. Linssin 516 pinnalla on tällöin hila 504, joka on valmistettu holografisesti tai fotolitografialla. Keksinnön mukaisessa ratkaisussa on tärkeää, että hila dispersoi yhdensuuntaista optista säteilyä, mikä on mahdollista, kun optinen säteily kollimoidaan tai kun hila sijaitsee tulorakoa modulaattorille kuvaavan linssin taittavassa pinnassa

tai tulorakoa modulaattorille kuvaavan peilin heijastavassa pinnassa kuten kai-kissa hakemuksen kuvioissa on esitetty.

Kuviossa 6 on esitetty keksinnön mukainen ratkaisu, jossa optisen modulaattorin toiminta perustuu siihen, että optisen modulaattorin moduloivien elementtien optisen säteilyn läpäisyä muutetaan. Tässä ratkaisussa tuloraosta 600, joka on tässä esimerkissä kuitukimpun pää, optinen säteily kohdistetaan peiliin 602, joka käsittää myös dispersiivisen komponentin 601. Tuloraon spektriksi hajotettu optinen säteily kuvataan koveralla peilillä 602 optiselle modulaattorille 604. Moduloitu optinen säteily läpäisee optisen modulaattorin 604 ja optinen säteily hajaantuu toiselle dispersiiviselle komponentille 605, joka on samanlainen kuin ensimmäinen dispersiivinen komponentti 602. Dispersiivinen komponentti 605 on samassa yhteydessä kuin kovera peilikin 606, koostaa vastaanottamastaan ainakin yhdestä aallonpituuksista mittaussäteilyä, jonka avulla peili 606 kuvaa tuloraon 600 kuvan modulaattorilta 604 lähtöraakoon 608, joka tässä esimerkissä myös on kuitukimpun pää.

Kuviossa 7A ja 7B on esitetty heijastavan ja läpäisevän optisen modulaattorin periaatekuvat. Heijastavana optisena modulaattorina voi toimia esimerkiksi DMD. DMD-modulaattorin käyttö yhdessä dispersiivisen komponentin kanssa, joka sekä dispersoi että koostaa optista säteilyä, saa aikaan erittäin pienien hajasäteilytason detektorilla ja näin erittäin pienien optisten tehojen detektointi on mahdollista. Kuviossa 7A esitetty DMD-modulaattori käsittää joukon matriisimuodossa olevia mikropeilielementtejä 700, joita voidaan kutakin liikuttaa itsenäisesti. Mikropeilien koko on esimerkiksi  $16 \mu\text{m} \times 16 \mu\text{m}$  ja peilejä voi olla vaaka- ja pystysuunnassa satoja. Kun peilien suuntaa muuttetaan, peileihin osunut optinen säteily heijastuu eri suuntiin kuten kohta 702 havainnollistaa tilannetta. Näin voidaan saada modulaattorille tullut optinen säteily heijastumaan halutulta osin detektorille. Kullakin modulaattorin elementillä on kaksi ääriarvoista tilaa, joihin elementti voidaan kytkeä: tila, jolloin elementti minimaalisesti vaimentaa detektorille menevää optista säteilyä, ja tila, jolloin elementti vaimentaa maksimaalisesti detektorille menevää optista säteilyä. Elementti voidaan yleensä kytkeä myös mihin tahansa tilaan näiden ääritilojen välissä. Kullakin elementillä voidaan siis moduloida detektorille menevää optista säteilyä ajan suhteen epäjatkuvalla tai jatkuvalla funktiolla. Kuviossa 7A olevassa esimerkissä aallonpituuus  $\lambda_1$  on suunnattu niin, että se etenee detektorille. Muut aallonpituudet  $\lambda_2 - \lambda_N$  on suunnattu niin, etteivät ne etene

detektorille. DMD-komponenttia on kuvattu tarkemmin US-patentijulkaisussa 5504575, joka otetaan tähän viitteenksi.

Läpäisevänä optisena modulaattorina voi toimia esimerkiksi LC-komponentti (Liquid Crystal) kuten kuviossa 7B on esitetty. LC-komponentin 5 toiminta perustuu optisen säteilyn polarisaatioon. Muuttamalla sähkökentän avulla nestekiteen kidemäistä rakennetta polarisoidun optisen säteilyn polarisaation suuntaa voidaan kiertää, mikä sinänsä on ammattimiehelle ilmeistä eikä sitä sen vuoksi tarvitse tässä yhteydessä selittää enempää. LC-modulaattoreissa elementtien tiloja voidaan ohjata siten, että kunkin modulaattorin elementin vaimennus muuttuu ajan suhteen epäjatkuvana, diskreettiarvoisena tai jatkuvana funktiona. Kuviossa 7B elementit 720 läpäisevät hyvin optista säteilyä ja elementit 722 taas vaimentavat voimakkaasti optista säteilyä. Tällöin parittomat aallonpituuudet  $\lambda_1, \lambda_3, \dots$  pääsevät detektorille, kun taas parilliset aallonpituuudet  $\lambda_2, \lambda_4, \dots$  eivät pääse detektorille. Erityisesti intensiteettimodulaattoreina voidaan käyttää myös magneto-optisia, akusto-optisia ja mekaanisia modulaattoreita. Mekaaninen modulaattori voi olla esimerkiksi pyörivä kiekko, jossa on kutakin aallonpituuuskaistaa varten läpäisevä alue eri etäisyydellä kiekon keskipisteestä.

Nestekidemodulaattorilla, jossa ei tällöin tarvitse käyttää hyväksi 20 polarisaatiota, voidaan muuttaa myös kunkin elementin aallonpituuuskaistan vaihetta. Aallonpituuuskaistan sähkökentän vaihe muuttuu, kun nestekiteen kidemäistä rakennetta muutetaan sähkökentällä, jolloin nestekiteen taitekerroin muuttuu. Taitekerroimen muuttuminen vaikuttaa suoraan optisen säteilyn nopeuteen nestekiteessä, mikä saa aikaan sen, että kuljettuaan saman matkan 25 eri nopeudella optisen säteilyn vaihe on muuttunut. Eri aallonpituuuskaistat erotetaan toisistaan ilmaisun yhteydessä vaiheen perusteella.

Vaihetta voidaan moduloida myös optisen modulaattorin elementtinä olevan liikkulan peilin avulla, jolloin kutakin elementtiä siirretään eri matka siten, että kunkin aallonpituuuskaistan kulkema matka detektorille muuttuu aallonpituuden osan verran. Vaihe detektoidaan interferenssin avulla ammattimiehelle sinänsä ilmeisellä tavalla.

Optisen modulaattorin elementillä voidaan aallonpituuuskaistan optista säteilyä moduloida siis siten, että muutetaan optisen säteilyn joitain ominaisuutta ajanfunktiona, jolloin eri elementtien moduloimat aallonpituuuskaistat 35 voidaan erottaa toisistaan vastaavalla tavalla demoduloimalla. Muutettavana ominaisuutena voi olla detektorille tulevan optisen säteilyn intensiteetti tai vai-

he. Yksinkertaisimillaan modulaatio on sellainen, että keksinnöllisessä ratkaisussa käytettävälle yhdelle detektorille ohjataan yksi aallonpituuksista kunkin ajanhetkenä. Tällainen ratkaisu toiminnan kannalta kuitenkin melko hidash.

- 5 Toisena vaihtoehtona on aaltomuotomodulaatio. Tällöin optisen modulaattorin eri elementtejä ohjataan siten, että eri aallonpituuksiaistojen intensiteetit vaihtelevat detektorilla erilaisen jatkuvan tai epäjatkuvan funktion mukaan. Yksi näistä ratkaisuista on moduloida eri elementtejä eri taajuuksilla. Tällöin kyseessä on taajuusjakoinen multipleksaus. Kutakin aallonpituuksista 10 moduloidaan silloin eri taajuudella, mikä suoritetaan siten, että kunkin modulaattorin elementti ohjataan värähtelemään tilasta toiseen eri modulointitaajuudella. Modulointitaajuus saa aallonpituuksiaistan kohdistumaan modulointitaajuudella aallonpituuksiaistojen yhtiseen detektoriin. Detektoinnin jälkeen aallonpituuksiaistojen sähköiset signaalit erotetaan toisistaan demoduloimalla. 15 Demodulointi voidaan suorittaa esimerkiksi erottamalla eritaajuiset modulaatiotaajuudet suodattamalla toisistaan tai demodulointi suoritetaan käänteis-Fourier-muunnoksella (IFFT, Inverse Fast Fourier Transform).

- 20 Eritaajuisten ohjausfunktioiden sijasta voidaan eri elementtejä ohjata erilaisilla jaksollisilla funktioilla. Tällöin jakson aikana eri elementtien aallonpituuksiaistat voidaan erottaa toisistaan funktion aaltomuodon perusteella. Yhtenä esimerkinä tällaisesta on binaarinen koodimultipleksaus, joka on epäjatkuva funktio. Tällöin kunkin aallonpituuksista koodataan modulaattorissa omalla koodillaan, mikä suoritetaan siten, että kutakin modulaattorin elementtiä kytketään ääritilasta toiseen esimerkiksi binaarikoodin mukaisesti. Yhdellä 25 detektorilla detektoinnin jälkeen kunkin aallonpituuksista voidaan erikseen analysoida purkamalla koodaus. Esimerkinä tällaisesta modulaatiosta on siinänsä tunnettu Hadamard-multipleksaus. Hadamard-muunnosta hyödyntävässä spektrometriassa käytetään tavallisesti monirakoriviä, mutta keksinnön mukaisessa ratkaisussa tarvitaan vain yksi lähtörako. Hadamard-30 multipleksausta on selitetty tarkemmin esimerkiksi patentijulkaisuissa US 4615619, US 3859515 ja kirjassa Hadamard Transform Optics, Martin Harwit, Neil J. A. Sloane, Academic Press, 1979, jotka otetaan tähän viitteeksi.

- 35 Aallonpituuksiaistojen multipleksaus vaatii paljon detektorin dynamiikalta. Tilannetta voidaan helpottaa useilla tavoilla. Taajuus- ja koodimultipleksauksessa eri aalonpituuksiaistat voidaan vaiheistaa siten, että yhden signaalin tehon laskiessa toisen mittaussignaalin teho nousee. Sellaiseen

spektriosaan kuuluvat aallonpituuksia, joita spektrin analysoinnissa ei tarvita, voidaan jättää moduloimatta, jolloin niiden pääsy detektorille estyy. Dynamikkavaatimus pienenee myös silloin, kun varataan mittauksen kannalta tärkeille aallonpituuksista joista viereen yksi tai useampi vapaa modulaation 5 taajuuskaista. Eriaisia modulaatioita ja demodulaatioita ohjaa ohjausyksikkö 112.

Keksinnöllistä ratkaisua voidaan soveltaa esimerkiksi aineepitoisuusmittauksessa. Mitattavina aineina voivat olla nesteiden ja kaasujen lisäksi kiinteät aineet. Optisen säteilyn läpäisy  $T$  kullakin aallonpituuudella  $\lambda$  riippuu 10 yhden tai useamman aineen konsentraatiosta  $C_j$  ja absorptiokertoimesta  $\alpha_j$  ja absorptiomatkasta  $l$  seuraavan kaavan mukaisesti

$$\ln[T(\lambda)] = \left( \sum_{j=1}^N C_j \alpha_j \right) l,$$

missä  $j$  on ainekohtainen indeksi. Koska kukin modulaattorin moduloima aallonpituuksista on eksinnön mukaisessa ratkaisussa kapeakaistainen, vastaa aallonpituuksia  $\lambda$  aallonpituuksista. Kapeakaistaisuus tarkoittaa UV - VIS - IR -alueella (UltraVioletti - VISible - InfraRed) tavallisesti korkeintaan muutamien kymmenien nanometrien kaistaa. Kaista on kapea myös silloin, kun yhden aallonpituuksistaan kaista on vain osa (esim. alle 2 %) koko mitattavasta aallonpituuksalueesta. Mittaamalla läpäisy  $T$  ennalta tunnetulla matkalla  $l$  ja käytämällä taulukoituja tietoja aineiden absorptiokertoimista  $\alpha_j$  voidaan kaavasta ratkaista ainekohtainen konsentraatio  $C_j$ . Mittalaite saadaan myös toimimaan siten, että laite kalibroidaan aluksi aineepitoisuksiltaan tunnetulla näytesarjan 20 mittauksilla ammattimiehelle sinänsä ilmeisellä tavalla. Tällöin absorptiokerrotoimia  $\alpha_j$  ja matkaa  $l$  ei tarvitse tuntea. Tyypillisiä pitoisuusmittauksia ovat esimerkiksi viljan proteiinipitoisuus, mittauskohteen kosteus (erityisesti paperin 25 kosteus) ja kaasupitoisuus (esim. metaanipitoisuus).

Keksinnön mukaisella ratkaisulla voidaan mitata myös ainekerroksen paksuutta. Tyypillinen sovellus on esimerkiksi kaoliinikerroksen paksuus 30 paperin päällä. Koska kaoliinilla on kapeakaistainen intensiteettihuippu ja paperin sellulla laajakaistainen tasainen intensiteettijakauma, kaoliinin paksuutta voidaan mitata vertaamalla kaoliinin intensiteettihuipun korkeutta tasaiseen sellun intensiteettijakaumaan ajan funktiona. Kun suhde muuttuu, muuttuu myös kaoliinikerroksen paksuus. Suhteen muutoksen suuruus ilmaiseen ka-

oliinikerroksen paksuuden muutoksen. Vastaavalla tavalla voidaan mitata monenlaisten ainekerrosten paksuutta kuten muovikalvon paksuutta.

Sekä ainepitoisuuden että aineen paksuuden mittauksessa aallonpituukskaistojen intensiteettiasteikon 0-pisteen virhe riippuu laitetypistä ja määrästä alueen, jolla spektrografin mittaama vaimennus on lineaarisessa suhteessa todelliseen vaimennukseen. Spektrografeilla luonnollisesti tavoitellaan mahdollisen suurta konsentraation vaihtelualueen mittauskykyä ja tämä alue on suoraan verrannollinen alueeseen, jolla spektrografin mittaama absorptio on lineaarinen. Hilan tai muiden optisten komponenttien tuottaman hajavalon merkitys on erityisen suuri miniatyritekniikoiden tapauksessa, sillä halvoilla massatuotantotekniikoilla valmistetut optiikat tuottavat korkean hajavalotason, mikä pienentää aallonpituukskaistojen intensiteetin mittauksessa dynamiikkaluetta. Keksinnöllisessä ratkaisussa spektrometrin rakenne (samanlaisen dispersioivan komponentin käyttö kahteen kertaan) vähentää hajavalon haittavai-  
15 kutuksia huomattavasti.

Keksinnöllisellä ratkaisulla voidaan mitata myös lämpötilaa. Tällöin seurataan mustan kappaleen säteilyn Wienin lain mukaista käytäytymistä. Musta kappale säteilee suurimmalla intensiteetillä aallonpituuudella  $\lambda_{\max}$ , joka riippuu lämpötilan  $T$  neljännestä potenssista eli kaavan muodossa ilmaistuna  
20  $\lambda_{\max} = \delta T^4$ , missä  $\delta$  on Stefan-Boltzmannin vakio. Mittaamalla aallonpituukskaistojen teho detektorilla aallonpituuden funktiona ja etsimällä suurin teho tiedetään suurimman intensiteetin aallonpituus  $\lambda_{\max}$ , josta voidaan laskea lämpötila kaavalla  $T = \left(\frac{\lambda_{\max}}{\delta}\right)^{\left(\frac{1}{4}\right)}$  ammattimiehelle sinänsä tunnetulla tavalla. Eriaisia spektrin analyysejä ja mittauksia suorittaa detekointi- ja mittausyksikkö 110.

Käytetyt optiset komponentit voivat perustua tavanomaiseen taittavaan optiikkaan (kuperat ja koverat linssit ja peilit) tai diffraktio-optiikkaan (Fresnel-linssit ja binaarioptiset komponentit). Spektrometrin tuotannossa suurin osa hinnasta syntyy kuitenkin lasista valmistetuista optisista komponenteista. Spektrometrin valmistuskustannuksia ja kokoa voidaan pienentää toteuttamalla spektrometri tasoaaltojohteella, LIGA-teknikalla ja puristemuo-vioptiikalla. LIGA-teknikka perustuu röntgen-litografiaan, elektroformaukseen ja valamiseen ja LIGA-teknikalla valmistettuja spektrografin optisia komponentteja voidaan käyttää erityisesti lähi-infrapuna-alueella. Näin saadaan ai-kaan miniatyrispektrometri, joka voidaan valmistaa yhdelle integroidulle piirille ja integroida helposti osaksi lähes mitä tahansa tutkimus- tai mittalaitetta. Kek-

sinnön mukaisessa ratkaisussa voidaan hajasäteilyn vaikutusta oleellisesti vähentää, mikä johtuu spektrometrin rakenteesta, jossa yhdenlaista dispersoivaa komponenttia käytetään sekä optisen säteilyn hajottamiseen spektriksi että eri aallonpituisien optisen säteilyn aallonpituskaitojen kokoamiseen saman-  
5 suuntaisiksi ja optisen modulaattorin käytöstä.

Elektroniset piirit voidaan toteuttaa kovoratkaisuna piirilevyllä, joka käsittää erillisiä elektroniikkakomponentteja, tai edullisemmin esimerkiksi VLSI-komponenteilla (Very Large Scale Integratd circuit) tai ASIC-piiriteknikkalla (Application Specific Integrated Circuit). Automaattinen tietojen-  
10 15 käsitteily voidaan keksinnön mukaisessa ratkaisussa suorittaa PC-tietokoneessa tai toteuttaa muuten ohjelmana, joka suoritetaan prosessorissa.

Vaikka keksintöä on edellä selostettu viitaten oheisten piirustusten mukaiseen esimerkkiin, on selvää, ettei keksintö ole rajoittunut siihen, vaan sitä voidaan muunnella monin tavoin oheisten patenttivaatimusten esittämän  
15 keksinnöllisen ajatuksen puitteissa.

**Patenttivaatimukset**

1. Menetelmä optisen säteilyn spektrin mittaamiseksi spektrometriilä, tunnettua siitä, että
    - valaistaan spektrometrin tulorako (104, 204, 232, 308, 500, 600)
  - 5 optisella säteilyllä ja kuvataan tulorako (104, 204, 232, 308, 500, 600) optiselle modulaattorille (108, 210, 238, 318, 406, 510, 604), joka käsittää moduloivia elementtejä;
    - hajotetaan dispersiivisellä komponentilla (106, 2062, 312, 401, 504, 601) tuloraon (104, 204, 232, 308, 500, 600) kuva spektriksi siten, että
  - 10 10 kokin spektrin aallonpituuus muodostaa tuloraosta (104, 204, 232, 308, 500, 600) oman kuvansa, jonka paikka optisen modulaattorin (108, 210, 238, 318, 406, 510, 604) elementeillä riippuu aallonpituuudesta;
    - moduloidaan dispersoitua tuloraon (104, 204, 232, 308, 500, 600) kuva ainakin yhdellä optisen modulaattorin (108, 210, 238, 318, 406, 510, 604) elementillä, jolloin muodostuu ainakin yksi tuloraon (104, 204, 232, 308, 500, 600) kuvalta moduloitu aallonpituuuskaista;
  - 15 15 15 - kohdistetaan ainakin yksi moduloitu aallonpituuuskaista dispersiiviselle komponentille (106, 2062, 312, 401, 504, 605), jolla koostetaan ainakin yhdestä moduloiduista aallonpituuuskaistasta dispersioton mittaussäteily siten,
  - 20 20 20 - että kuva muodostettaessa kaikilla eri aallonpituuksilla tuloraon (104, 204, 232, 308, 500, 600) kuvat muodostuvat samaan paikkaan aallonpituuudesta riippumatta;
  - 25 25 25 - kuvataan dispersiottoman mittaussäteilyn avulla tulorako (104, 204, 232, 308, 500, 600) lähtörakoon (104, 214, 242, 322, 514);
  - detektoidaan lähtöraosta (104, 214, 242, 322, 514) saatava mittaussäteily yhdellä detektorilla (110, 216, 244, 326, 424), joka muuntaa mittaussäteilyn sähköiseksi mittaussignaaliksi;
  - demoduloidaan sähköinen mittaussignaali eri aallonpituuuskaistojen aikaansamien signaalikomponenttien erottamiseksi toisistaan; ja
  - 30 30 30 - mitataan ainakin yhtä aallonpituuuskaistaa ainakin yhden signaalikomponentin avulla.
2. Patenttivaatimuksen 1 mukainen menetelmä, tunnettua siitä, että valaistaan tulorako (104, 204, 232, 308, 500, 600) näytteestä (102, 202, 230, 304) tulevalla optisella säteilyllä.

3. Patenttivaatimuksen 1 mukainen menetelmä, tunnettua siitä, että valaistaan näyte (102, 202, 230, 304) mittaussäteilyllä ja kuvataan näytteestä (102, 202, 230, 304) tulevan mittaussäteilyn avulla tulorako (104, 204, 232, 308, 500, 600) lähtörakoon (104, 214, 242, 322, 514).

5 4. Patenttivaatimuksen 1 mukainen menetelmä, tunnettua siitä, että moduloidaan optisen modulaattorin (108, 210, 238, 318, 406, 510, 604) elementtien optisia ominaisuuksia ajan funktiona siten, että eri aallonpituuksikaistoja moduloidaan erilaisilla aaltomuodoilla ja mittauksen yhteydessä eri aallonpituuksikaistat erotetaan toisistaan modulaatiota vastaavalla demodulaati-  
10 olla.

15 5. Patenttivaatimuksen 1 mukainen menetelmä, tunnettua siitä, että moduloidaan optisen modulaattorin (108, 210, 238, 318, 406, 510, 604) elementtien optisia ominaisuuksia ajan funktiona siten, että eri aallonpituuksikaistoja multipleksataan aikajakoisesti ja mittauksen yhteydessä eri aallonpi-  
tuuskaistat erotetaan toisistaan modulaatiota vastaavalla demodulaatiolla.

20 6. Patenttivaatimuksen 1 mukainen menetelmä, tunnettua siitä, että moduloidaan optisen modulaattorin (108, 210, 238, 318, 406, 510, 604) elementtien optisia ominaisuuksia ajan funktiona siten, että eri aallonpituuksikaistoja multipleksataan taajuusjakoisesti ja mittauksen yhteydessä eri aallon-  
piusuksikaistat erotetaan toisistaan modulaatiota vastaavalla demodulaatiolla tai suodattamalla taajuudet erilleen toisistaan.

25 7. Patenttivaatimuksen 1 mukainen menetelmä, tunnettua siitä, että moduloidaan optisen modulaattorin (108, 210, 238, 318, 406, 510, 604) elementtien optisia ominaisuuksia ajan funktiona siten, että eri aallonpituuksikaistoja multipleksataan koodijakoisesti ja mittauksen yhteydessä eri aallonpi-  
tuuskaistat erotetaan toisistaan koodausta vastaavalla dekoodauksella.

8. Patenttivaatimuksen 1 mukainen menetelmä, tunnettua siitä, että mittauksessa käytetään vain yhtä dispersiivistä komponenttia (106, 2062, 312, 401, 504, 601).

30 9. Patenttivaatimuksen 1 mukainen menetelmä, tunnettua siitä, että määritetään mitatun ainakin yhden aallonpituuksistan avulla ainakin yhden aineen pitoisuus näytteessä (102, 202, 230, 304).

10. Patenttivaatimuksen 1 mukainen menetelmä, t u n n e t t u siitä, että määritetään mitatun ainakin yhden aallonpituuksistaan avulla ainekeroksen paksuus näytteessä (102, 202, 230, 304).

11. Patenttivaatimuksen 1 mukainen menetelmä, t u n n e t t u siitä, 5 että määritetään mitatun ainakin yhden aallonpituuksistaan avulla näytteen (102, 202, 230, 304) lämpötila.

12. Patenttivaatimuksen 1 mukainen menetelmä, t u n n e t t u siitä, että detektori (110, 216, 244, 326, 424) muodostaa lähtöraon (104, 214, 242, 322, 514).

10 13. Spektrometri optisen spektrin mittamiseksi, t u n n e t t u siitä, että spektrometri käsittää: tuloraon (104, 204, 232, 308, 500, 600), ainakin yhden dispersiivisen komponentin (106, 2062, 312, 401, 504, 601, 605), ainakin yhden kuvaavan komponentin (106, 206, 234, 314, 402, 506, 516, 602, 606), optisen modulaattorin (108, 210, 238, 318, 406, 510, 604), lähtöraon (104, 15 214, 242, 322, 514) ja yhden detektorin (110, 216, 244, 326, 424) ja

- spektrometrissa tulorako (104, 204, 232, 308, 500, 600) on sovitettu rajoittamaan spektrometriin tulevan optisen säteilyn ja kuvaava komponentti (106, 206, 234, 314, 402, 506, 516, 602) on sovitettu kuvaamaan tuloraon (104, 204, 232, 308, 500, 600) modulaattorille (108, 210, 238, 318, 406, 20 510, 604), joka käsittää moduloivia elementtejä;

- dispersiivinen komponentti (106, 2062, 312, 401, 504, 601) on sovitettu hajottamaan tuloraon (104, 204, 232, 308, 500, 600) kuvan spektriksi siten, että kukin spektrin aallonpituuus muodostaa tuloraosta (104, 204, 232, 308, 500, 600) oman kuvansa, jonka paikka optisen modulaattorin (108, 210, 25 238, 318, 406, 510, 604) elementeillä riippuu aallonpituudesta;

- optinen modulaattori (108, 210, 238, 318, 406, 510, 604) on sovitettu moduloimaan dispersoitua tuloraon (104, 204, 232, 308, 500, 600) kuvaan ainakin yhdellä optisen modulaattorin (108, 210, 238, 318, 406, 510, 604) elementillä ainakin yhden tuloraon (104, 204, 232, 308, 500, 600) kuvalta moduloidun aallonpituuksistaan muodostamiseksi;

- dispersiivinen komponentti (106, 2062, 312, 401, 504, 605) on sovitettu koostamaan ainakin yhdestä moduloidusta aallonpituuksistaan dispersiottoman mittaussäteilyn siten, että kuva muodostetaessa kaikilla eri

aallonpituuksilla tuloraon (104, 204, 232, 308, 500, 600) kuvat muodostuvat samaan paikkaan aallonpituuudesta riippumatta;

- kuvaava komponentti (106, 206, 234, 314, 402, 506, 516, 606) on sovitettu kuvaamaan mittaussäteilyn avulla tulerako (104, 204, 232, 308, 500, 600) lähtörakoon (104, 214, 242, 322, 514);

- - yksi detektori (110, 216, 244, 326, 424) on sovitettu detektoimaan lähtöraosta (104, 214, 242, 322, 514) tulevaa mittaussäteilyä ja muuntamaan mittaussäteilyn sähköiseksi mittaussignaaliksi;

- - spektrometri on sovitettu demoduloimaan sähköisen mittaussignalin eri aallonpituuuskaistojen aiheuttamien signaalikomponenttien erottamiseksi toisistaan; ja
  - spektrometri on sovitettu mittamaan ainakin yhtä aallonpituuuskaistaa ainakin yhden signaalikomponentin avulla.

- - 14. Patentivaatimuksen 13 mukainen spektrometri, tunnettu siitä, että spektrometri on sovitettu valaisemaan tulerako (104, 204, 232, 308, 500, 600) näytteestä (102, 202, 230, 304) tulevalla optisella säteilyllä.

- - 15. Patentivaatimuksen 13 mukainen spektrometri, tunnettu siitä, että spektrometri on sovitettu valaisemaan näyte (102, 202, 230, 304) mittaussäteilyllä ja kuvaamaan näytteestä (102, 202, 230, 304) tuleva mittaus-säteily lähtörakoon (104, 214, 242, 322, 514).

- - 16. Patentivaatimuksen 1 mukainen menetelmä, tunnettu siitä, että spektrometri on sovitettu moduloimaan optisen modulaattorin (108, 210, 238, 318, 406, 510, 604) elementtien optisia ominaisuuksia ajan funktio-nsten, että eri aallonpituuuskaistoja moduloidaan erilaisilla aaltamuodoilla ja spektrometri on sovitettu erottamaan eri aallonpituuuskaistat toisistaan modu-laatiota vastaavalla demodulaatiolla.

- - 17. Patentivaatimuksen 13 mukainen spektrometri, tunnettu siitä, että spektrometri on sovitettu moduloimaan optisen modulaattorin (108, 210, 238, 318, 406, 510, 604) elementtien optisia ominaisuuksia ajan funktio-na siten, että eri aallonpituuuskaistoja multipleksataan aikajakoisesti ja spek-trometri on sovitettu erottamaan eri aallonpituuuskaistat toisistaan modulaatiota vastaavalla demodulaatiolla.

18. Patenttivaatimuksen 13 mukainen spektrometri, tunnettu siitä, että spektrometri on sovitettu moduloimaan optisen modulaattorin (108, 210, 238, 318, 406, 510, 604) elementtien optisia ominaisuuksia ajan funktiona siten, että eri aallonpituuuskaistoja multipleksataan taajuusjakoisesti ja 5 spektrometri on sovitettu erottamaan eri aallonpituuuskaistat toisistaan modulaatiota vastaavalla demodulaatiolla tai suodatuksella.

19. Patenttivaatimuksen 13 mukainen spektrometri, tunnettu siitä, että spektrometri on sovitettu moduloimaan optisen modulaattorin (108, 210, 238, 318, 406, 510, 604) elementtien optisia ominaisuuksia ajan funktiona siten, että eri aallonpituuuskaistoja multipleksataan koodijakoisesti ja spektrometri on sovitettu erottamaan eri aallonpituuuskaistat toisistaan koodausta 10 vastaavalla dekoodauksella.

20. Patenttivaatimuksen 13 mukainen spektrometri, tunnettu siitä, että spektrometri käsittää vain yhden dispersiivisen komponentin (106, 15 2062, 312, 401, 504, 601).

21. Patenttivaatimuksen 13 mukainen spektrometri, tunnettu siitä, että spektrometri on valmistettu yhdelle integroidulle piirille.

22. Patenttivaatimuksen 13 mukainen spektrometri, tunnettu siitä, että spektrometri on sovitettu määrittämään mitatun ainakin yhden aallonpituuuskaistan avulla ainakin yhden aineen pitoisuus näytteessä (102, 202, 20 230, 304).

23. Patenttivaatimuksen 13 mukainen spektrometri, tunnettu siitä, että spektrometri on sovitettu määrittämään mitatun ainakin yhden aalonpituuuskaistan avulla ainekerroksen paksuus näytteessä (102, 202, 230, 25 304).

24. Patenttivaatimuksen 13 mukainen spektrometri, tunnettu siitä, että spektrometri on sovitettu määrittämään mitatun ainakin yhden aalonpituuuskaistan avulla näytteen (102, 202, 230, 304) lämpötila.

25. Patenttivaatimuksen 13 mukainen spektrometri, tunnettu 30 siitä, että detektori (110, 216, 244, 326, 424) on lähtörako (104, 214, 242, 322, 514).

### (57) Tiivistelmä

Keksinnön kohteena on menetelmä optisen säteilyn spektrin mittamiseksi ja menetelmän toteuttava spektrometri. Keksinnöllisessä ratkaisussa spektrometrin tulorako (104) valaistaan optisella säteilyllä. Optinen komponentti (106) kuvaa optisella säteilyllä tuloraon (104) optiselle modulaattorille (108) ja hajottaa optisen säteilyn spektriksi. Spektriä moduloidaan optisella modulaattorilla (108). Optinen komponentti (106) koostaa spekristä dispersiotonta mittaus-säteilyä ja kuvaa mittaussäteilyn käsittämän tuloraon (104) lähtörakoon (104), joka voi olla sama tai eri kuin tulorako (104). Lähtöraosta (104) detektoidaan mittaussäteilyä detektorilla (110), joka muuntaa mittaussäteilyn sähköiseksi mittaussignaaliksi. Mittaussignaali demoduloidaan eri aallonpituuksiaistojen aikaansaamien signaalikomponenttien erottamiseksi toisistaan ja spektrometri mittaa ainakin yhtä aallonpituuksiaistaan ainakin yhden signaalikomponentin avulla, jota voidaan käyttää näytteen ominaisuuksien määrittämiseen.

(Kuvio 1A)

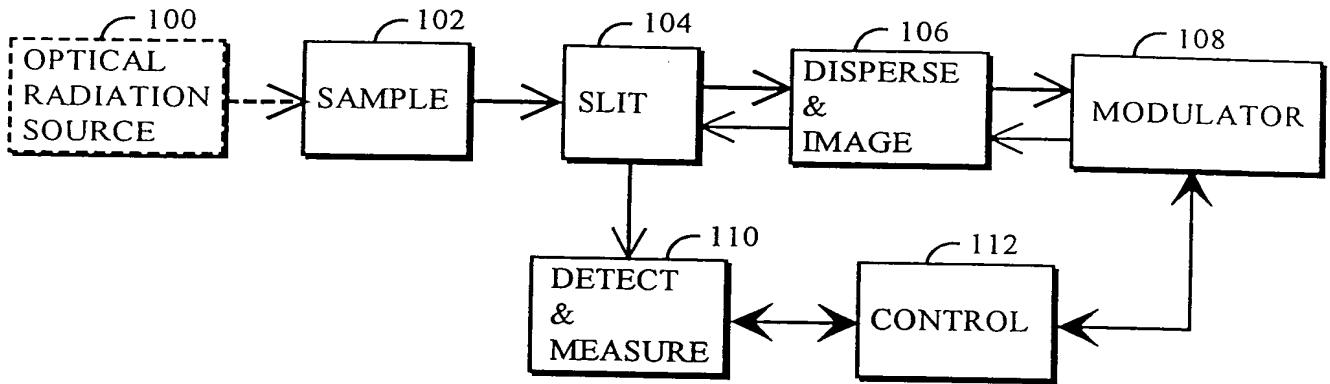


FIG. 1A

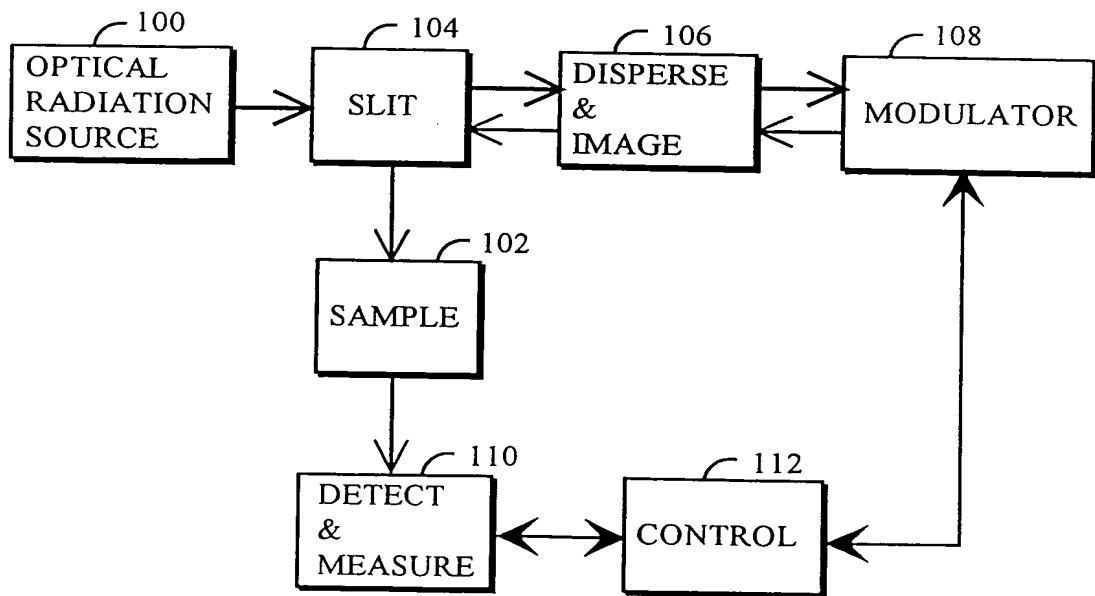
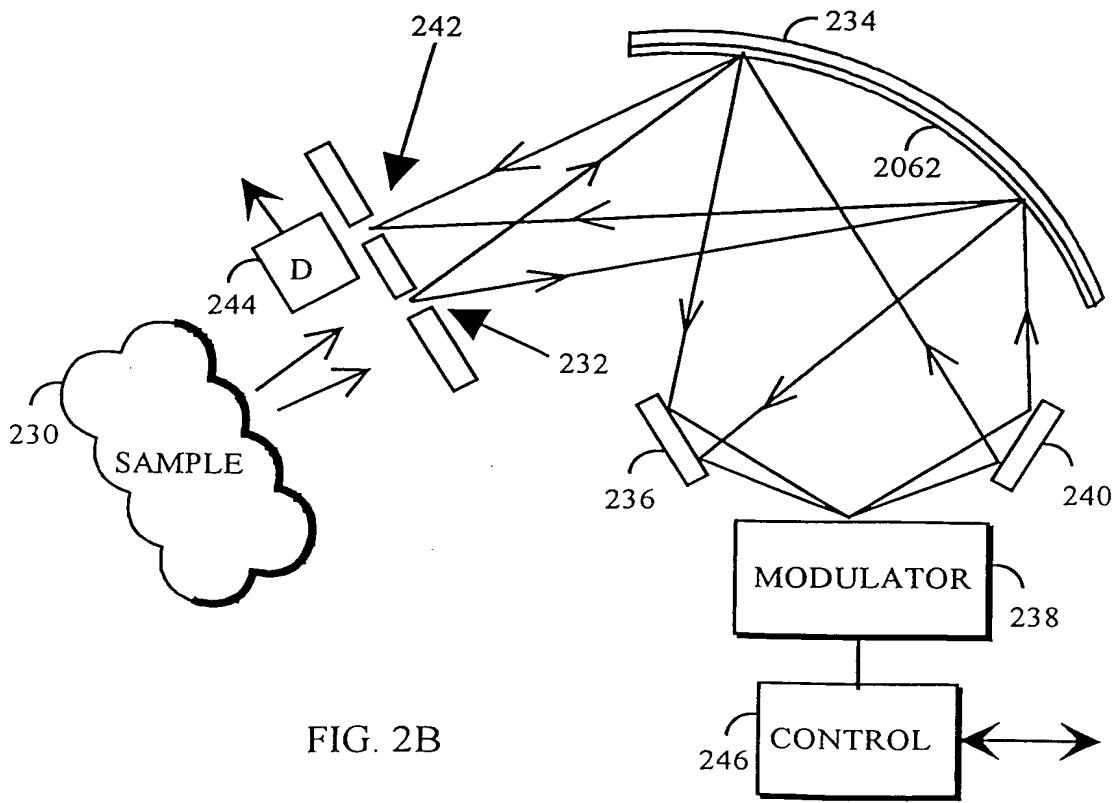
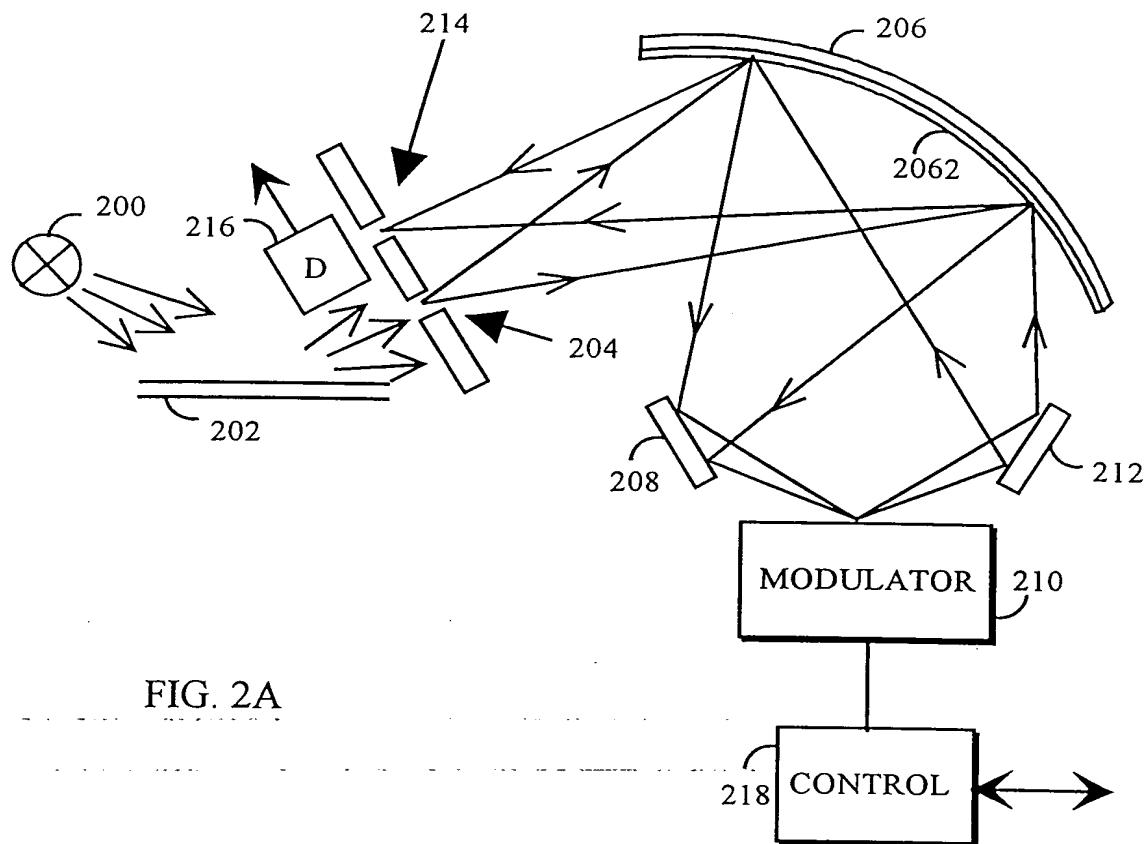


FIG. 1B



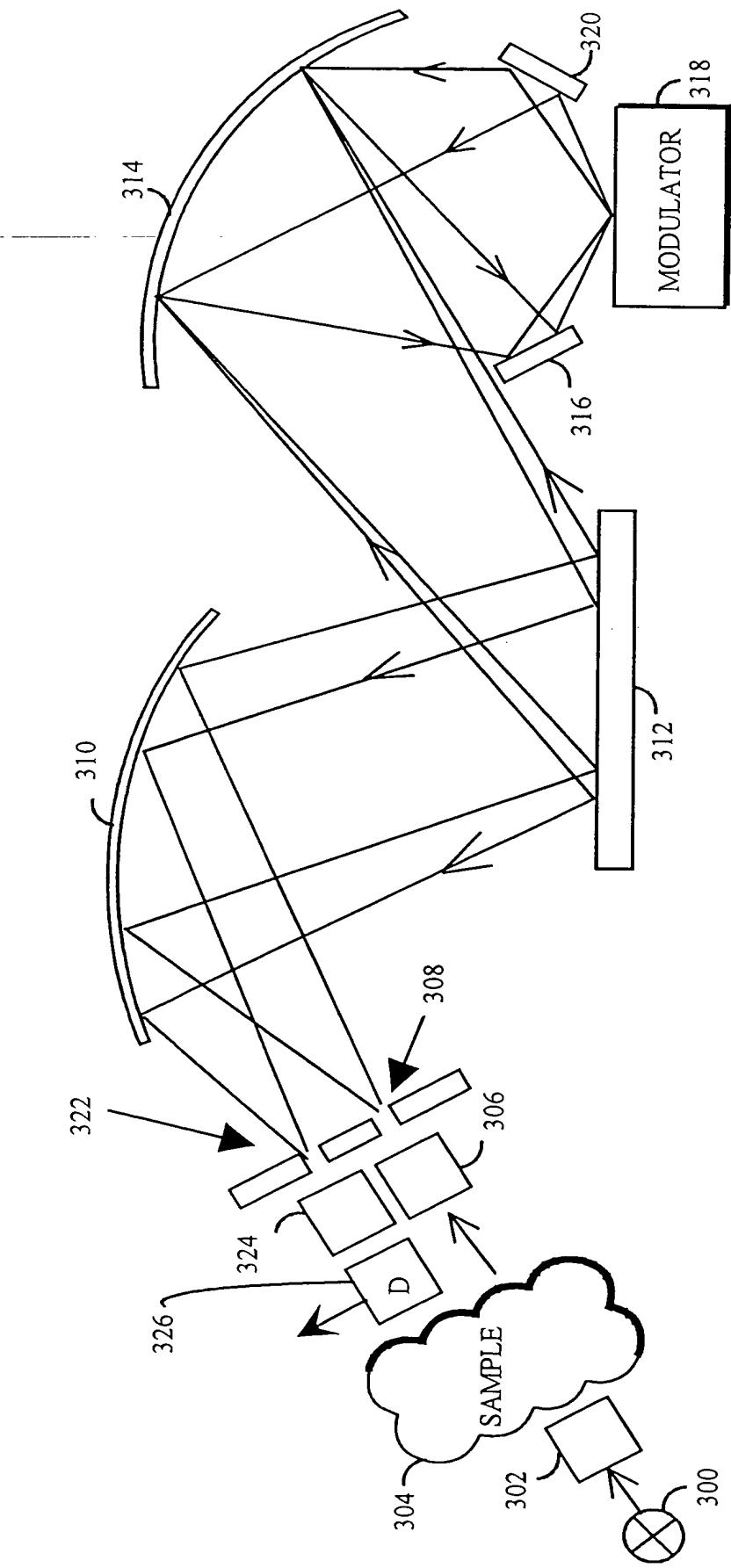
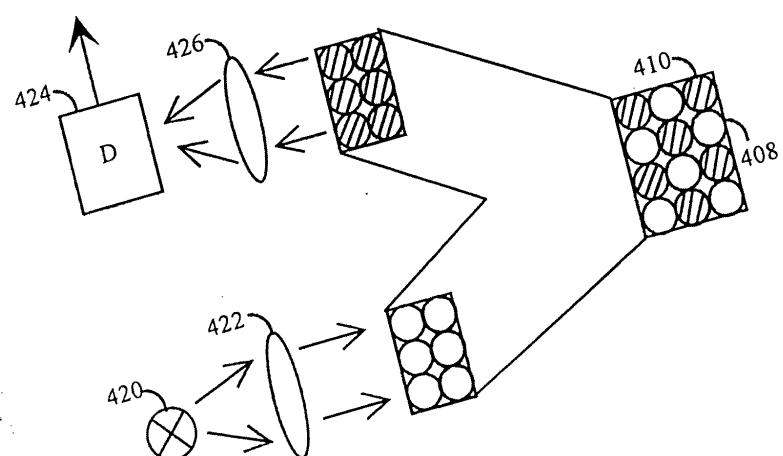
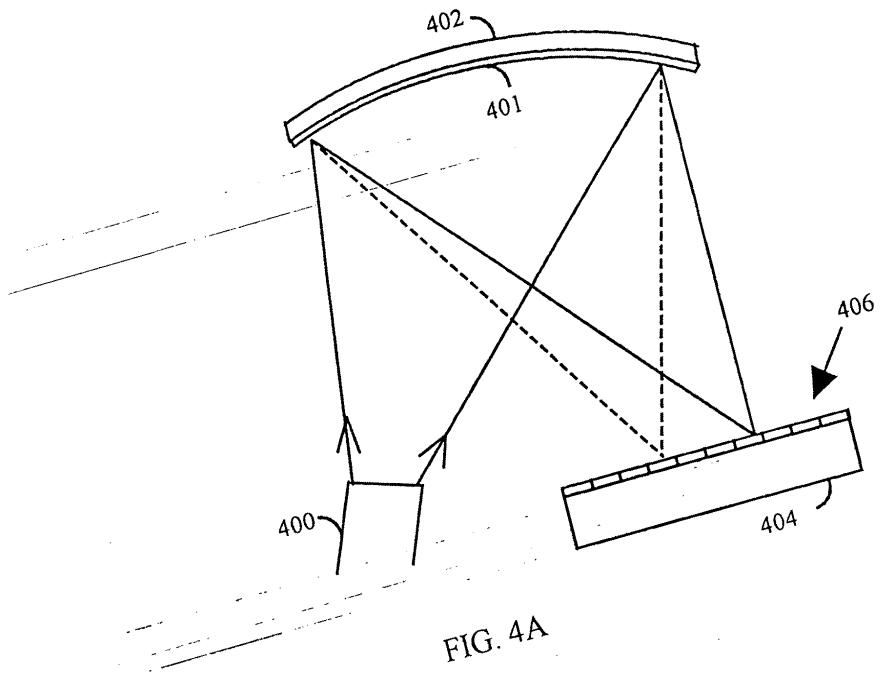


FIG. 3

4/6



5/6

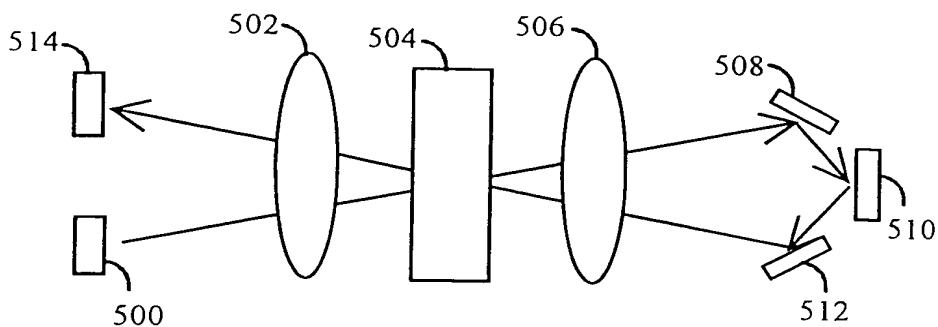


FIG. 5A

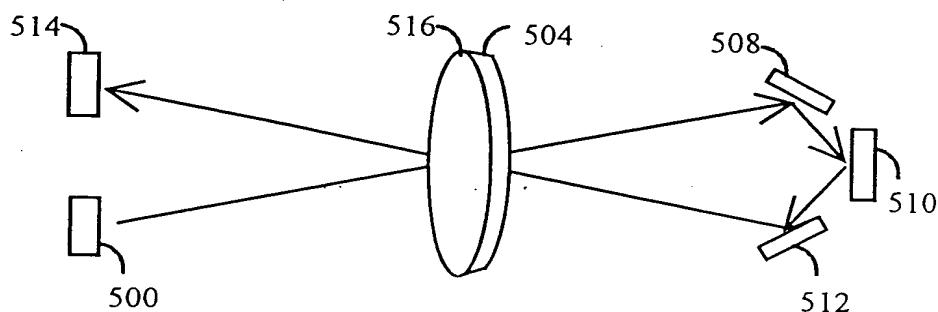


FIG. 5B

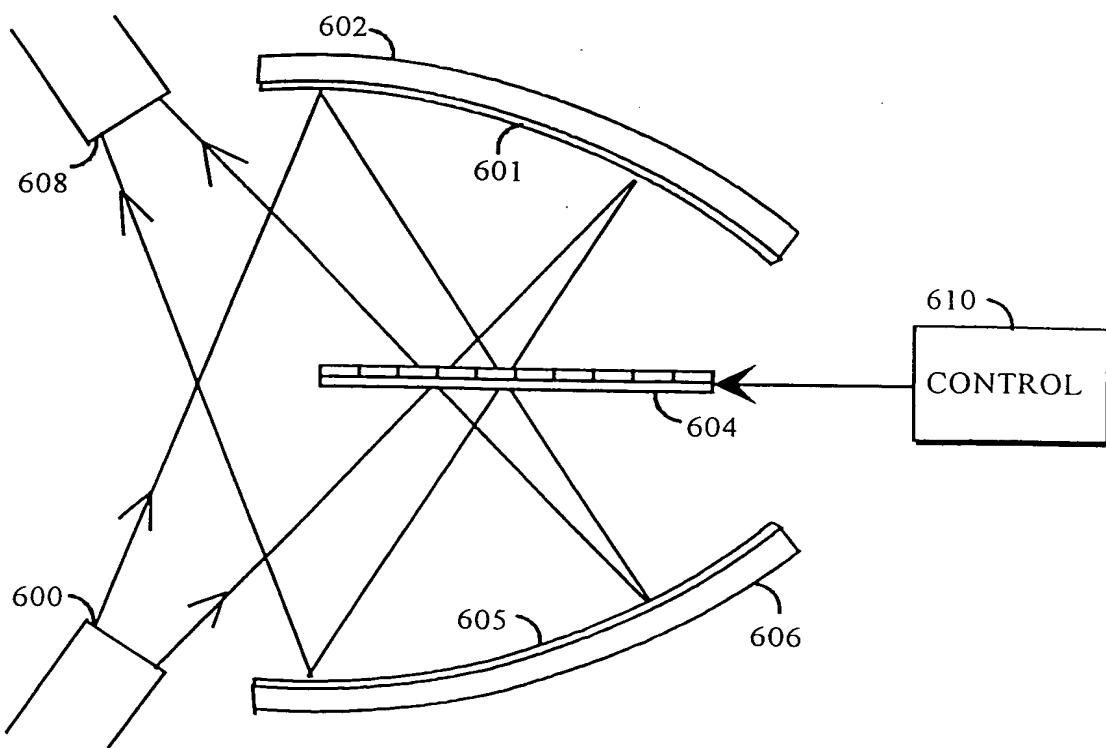


FIG. 6

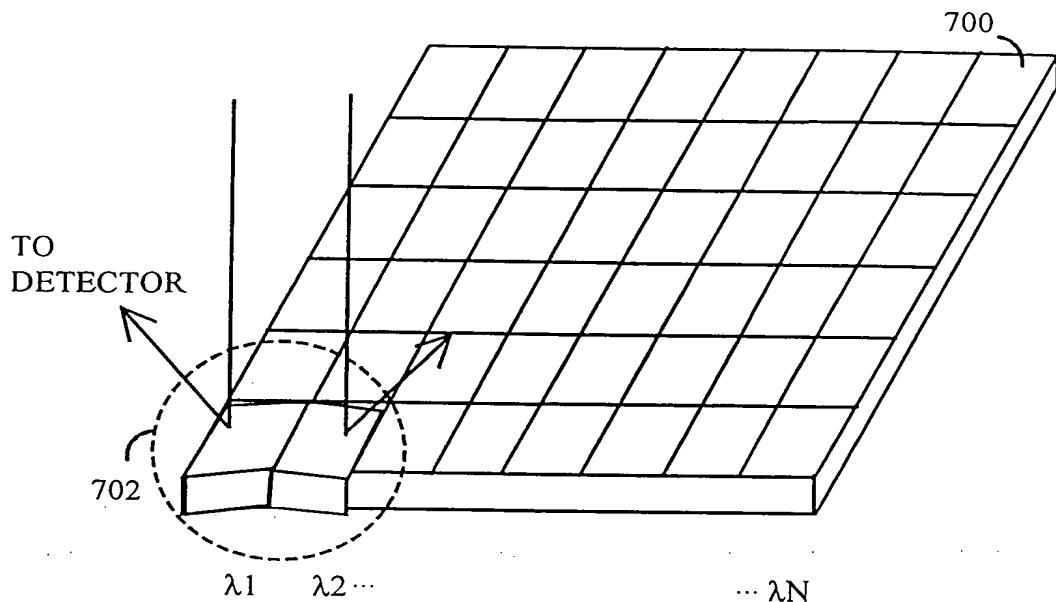


FIG. 7A

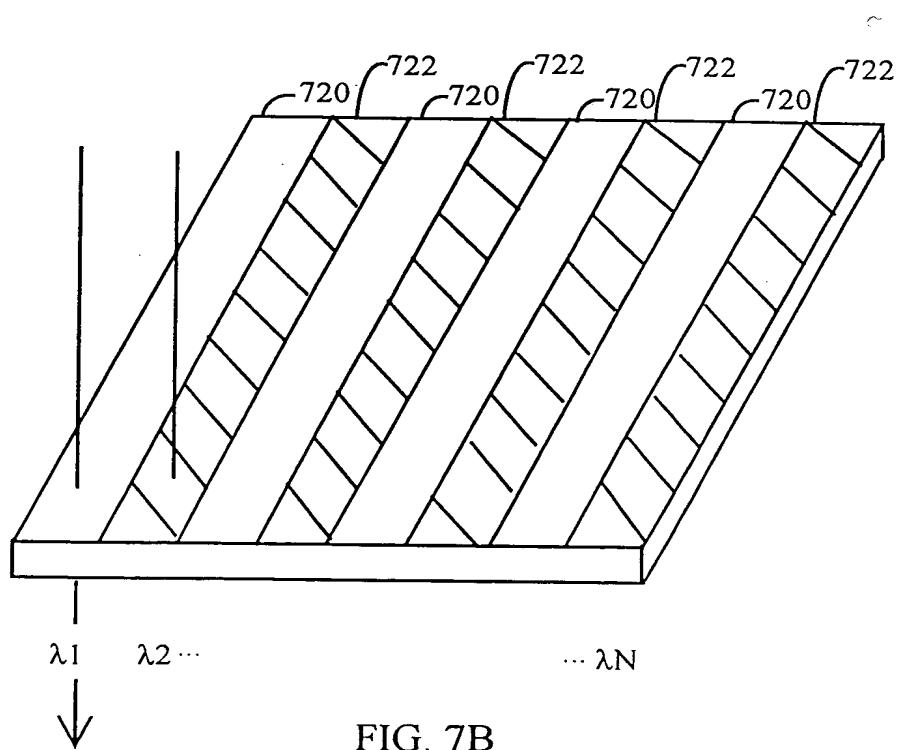


FIG. 7B

